

基于小波分析的低速重载设备故障诊断*

高立新 张建宇 崔玲丽

(北京工业大学先进制造技术重点实验室 北京 100022)

丁庆新

(中国石油大学机电工程学院 北京 102249)

摘要：低速重载设备突发故障难于识别，一旦发生，损失巨大。振动监测技术虽可以作为设备维护的重要手段，但常规的频谱分析无法准确提取低速轴上的故障特征。对实时监测的振动数据，采用小波分解技术可以获得必要的低频段信息。某个时段内的信号经小波变换后所定义的小波分层突变系数，可以作为判别低转频微冲击故障隐患的特征值，而且该系数趋势图还可有效刻画出故障部位的劣化过程；对同一组监测数据，分别采用细化谱技术和小波分解+FFT 的复合信号处理技术进行比较分析，结果表明，由于 FFT 分析的局限性，细化谱无法准确识别出故障原因及部位，而后者采用复合信号处理方法提取的故障特征频率对应的振幅变化剧烈得多，此法有助于低速重载设备早期故障的准确识别。

关键词：低速重载 频谱分析 小波分析

中图分类号：TH17

0 前言

在工程应用中，可靠提取低速重载设备振动微冲击特征的技术和方法较少，导致低速重载设备零部件出现破碎或断裂等故障隐患时，难以发现，恶性事故频频发生。

2003 年 4 月 20 日，某厂高炉炉顶传动齿轮箱旋转电流升高，布料器多次起停后，旋转电流均超标。晚上 20 时，传动齿轮箱已根本无法运行，开箱检查发现直径 2 m 以上的大型回转支承轴承被压溃，高炉被迫停产 5 d。

2005 年 1 月 19 日，某厂高线初轧机齿轮箱因输出轴轴承损毁被迫停机 56 h，此前的 2003 年 5 月，也曾因类似事故导致停机 63 h。

低速重载大型设备(例如斗轮式堆取料机和无料钟炉顶气密箱等)是现代工业的命脉，若发生突发事件将导致整个企业生产瘫痪。为了保证正常生产秩序，迫切需要开展低速重载设备振动微冲击特征提取的研究工作。

轴承是低速重载设备中最易损坏的零件之一，轴承常见的冲击故障有裂纹和剥落等，当发生这类故障时，各零件之间存在着冲击力，这种冲击力反应到加速度传感器上，使传感器输出产生一种冲击信号^[1]，由于这种冲击力的时间极短，传感器输出

为脉冲宽度不足 1 μ s 的窄脉冲。这种周期性的微弱冲击信号相对正常的振动信号和干扰信号，能量很小、脉宽很窄，常规的采集方法很难获得低速重载轴承裂纹或剥落等故障的微弱冲击信号。

低速重载设备特有的低转频特性，更增加了冲击故障特征提取的难度。提取不到设备故障特征频率将无法进行故障诊断，当重大事故来临时毫无察觉是极其危险的。

国内外学者多采用解调技术研究齿轮、轴承等旋转零部件的故障特征提取问题。W. Y. Wang^[2]提出了使用共振解调技术对齿轮箱的冲击故障进行诊断，其所用共振解调技术是通过软件实现的，通过对仿真数据的分析，验证了共振解调技术的正确性。但是对于低速重载设备的故障未能说明其有效性。王志刚等^[3]以某火力发电厂斗轮式堆取料机回转支承为实例介绍了低速重载轴承的故障诊断，使用传感器激振的共振解调技术提取微弱冲击故障。在国内工业现场使用中，未见软件解调进行低速重载设备轴承诊断成功的实例；硬件解调制造工艺复杂，应用环境恶劣，目前也未进入实用阶段。

小波变换在提取微弱信号方面有独特的优势^[4,5]，对低速重载齿轮箱螺柱拉断故障提取隐患特征的成功^[6]，促进了其在低速重载轴承诊断中的研究和应用，对国内某轧机齿轮箱重载轴承破碎振动信号的分析表明：小波分析提取的特征值对重载轴承隐患的敏感性较好，可以用这些特征值进行故障诊断。

* 北京市科委(H030330050110)和北京工业大学博士科研启动基金(KZ0107200382, 00138)资助项目。20050601 收到初稿，20051010 收到修改稿

1 小波分析技术

传统傅里叶变换可以分析信号所含有的频率信息，但不能同时分析一定频率段所对应的时域信息，因此，不能全面、简单而清晰地描述冲击信号局部时域特征和故障发生的时间历程，也就是说，傅里叶分析不具有局部定位能力。

重载设备低速轴轴承隐患的特征频率极低，一般在频谱图的最左端，很容易被诊断人员忽略；更由于系统本身振动大，淹没了有隐患零部件的特征频率，使诊断工作极为困难。传统的频谱分析、细化谱以及倒频谱技术等不能有效地从强背景噪声中提取出潜在的故障特征。

相对傅里叶变换，小波分析在信号的特征提取方面具有较大的优越性。这主要表现在小波分析同时具有较好的时频特性。小波分析把每个信号表示为由基小波经过伸缩与平移得到的信号叠加，伸缩因子的改变决定了信号的不同分辨率，平移与伸缩的改变决定了这种表示可聚焦于不同时刻，并且对高频成分采用逐渐精细的时域取样步长，从而可以聚焦到信号的任意细节。小波分析具有多分辨率分析的特点，在低频部分具有较高的频率分辨率和较低的时间分辨率，在高频部分具有较高的时间分辨率和较低的频率分辨率，非常适合探测正常信号中夹带的瞬间反常现象并展示其成分^[7]。

小波分析将信号在不同尺度上展开，提取信号在不同频带的特征，同时保留信号在各尺度上的时域特征，小波分析每次对信号的低频部分进行分解，高频部分保留不动，而且它的频率分辨率与 2^j (j 为小波分解的级数)成正比，因此可对信号低频部分做详细观察。类似的过程对每次分解后的低频部分可重复进行下去，即每一级分解把该级输入信号分解成一个低频的粗略逼近和一个高频的细节部分；而且每级输出采样率可以再减半，这样就将原始信号 $x(n)$ 进行了多分辨率分解^[8,9]。

2 小波突变系数的趋势分析

2003 年 5 月 6 日 20:03，国内某轧机齿轮箱(图 1)突发故障造成整个轧制线停产，起因是 1 号主输出轴的底部轴承 C10 由于重载、杂质等影响，各零件发生点蚀、磨损直至破碎(图 2)，由于轴 VI 底部失去支撑，无法在其回转中心上旋转，导致轴上齿轮受力不均，多个齿轮上的轮齿被折断。

该轧机传动齿轮箱安装了振动监测系统，传感

器采用了美国 PCB 公司的 608A11，现场预调仪选用 QTC350。系统软件具有频谱分析等基本功能，但由于低速重载设备故障的独特性，此次事故发生前，系统未能识别出故障的早期特征。鉴于小波分析技术对非平稳信号分析的优越性，遂采用此法对监测数据进行了深入研究。

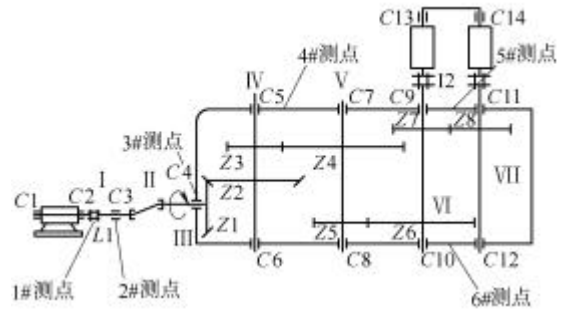


图 1 某钢厂轧机齿轮箱传动简图



图 2 轧机齿轮箱 C10 轴承损坏实物

采用小波分析方法对监测系统采集到的振动信号进行五层分解。对于某小波分层，在某时刻开始的一定时间段内连续取 m 组数据，出现较大峰峰值的组数为 n 。那么，定义小波分层的突变系数如下

$$k = n/m$$

根据该设备运行状况，较大峰峰值定义为正常工作状态下该层峰峰平均值的 1.3 倍。

小波突变系数计算过程如下：确定振动幅值有明显变化的频段。计算幅值明显变化频段每组自采样起始点的小波分层突变系数。用小波分层突变系数作趋势图。根据趋势图预测运行设备劣化情况，并初步判断有故障隐患的零部件。

2.1 振动信号的五层分解

如图 1 所示，由于输出轴转速较低，低速重载齿轮箱所包含的主要是 0 ~ 1 000 Hz 的中低频成分。由于 DB5 小波函数较其他小波分析能更明显地反映出故障特征，故选择该函数将信号逐层分解成 [0,500]，[0,250]，[0,125]，[0,62.5]，[0,31.25] 等 5 个频段，分别对应尺度 1 到尺度 5，然后比较每个频段的分解波形。通常，[0,500]Hz 含有各种中低频

成分 $[0,250]$ Hz 已不包含联轴节啮合频率和齿轮轴承特征频率的高次谐波 $[0,125]$ Hz 含有部分高速轴承外圈特征频率和 Z3/Z4 齿轮啮合频率 $[0,62.5]$ Hz 含有部分高速轴承滚动体特征频率 $[0,31.25]$ Hz 则以各轴轴频和轴承保持架特征频率为主。若某一段波形振动幅值有明显变化,就可以选取该频段信号应用小波分层突变系数进行设备劣化预测和故障诊断。

图 3 为故障发生前测点 3 在 17:45、18:00、19:57、20:03 时刻的原始波形及小波三、四、五层

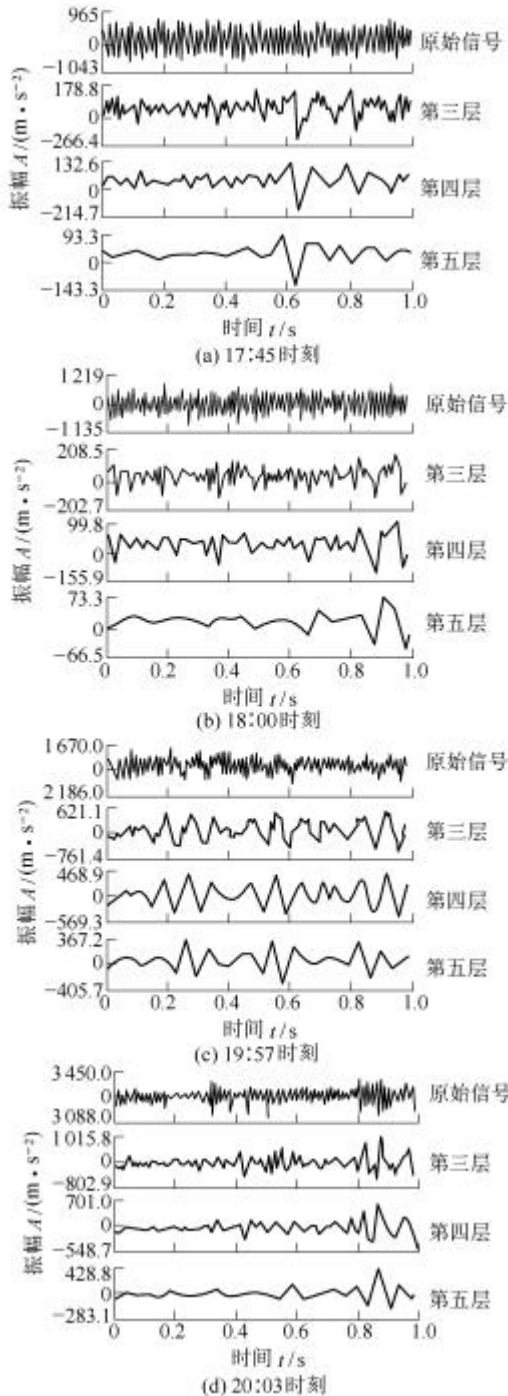


图 3 故障发生前原始波形与小波五层分解对比

分解图,由 17:45 时刻的波形可以看到,原始波形变化最快,但是没有明显突变点;第五层分解波形变化最慢,基本平坦,但是在 0.624 s 处振动幅值有明显突变,据此可以选取第五层应用小波分层突变系数,同时也表明故障零部件的特征频率处于 $[0,31.25]$ Hz 的低频段(表 1),转速低的输出轴部件可能是主要故障源。

表 1 17:45 时刻的波形图貌

波形类型	频段	波形变化频率	波形图貌
原始波形	$[0,1000]$	最快	没有明显突变点
小波三层分解	$[0,125]$	较快	除 0.624 s 处有明显突变外,还有多处小突变
小波四层分解	$[0,62.5]$	较慢	0.624 s 处有明显突变点,小突变处减少
小波五层分解	$[0,31.25]$	最慢	基本平坦,0.624 s 处突变明显

从 19:57、20:03 时刻原始波形及小波低频各层分解结果可见:原始时域波形发生严重畸变,小波各层波形变化剧烈,至 20:03 彻底崩溃前,虽然各层波形波动趋于平缓,但振动幅值急剧增大。

2.2 小波五层突变系数计算

根据小波突变系数的定义,以 1 h 为数据段计算小波五层突变系数。由于监测系统每 3 min 采集一次数据,则式 $k=n/m$ 中 m 为 20,根据设备工况,较大峰峰值取为 $100 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 。表 2 为故障发生前的监测数据经小波分解后的统计结果。可见,在 17:24~18:21 时段内,小波五层低频分解值在 $100 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 以上的数据有 17:45、18:15、18:18 三个时间,根据前述定义,小波突变系数 a 为 $3/20=0.15$ 。

表 2 17:24~18:21 时刻测点 3 原始波形及小波层低频分解结果统计 $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$

时刻	原始振动方均根值	小波五层分解结果(低频幅值)	时刻	原始振动方均根值	小波五层分解结果(低频幅值)
17:24	1264	35.4	17:54	630	44.6
17:27	460	33.2	17:57	603	28.3
17:30	1245	44.5	18:00	1219	86.5
17:33	1181	37.9	18:03	956	28.5
17:36	580	35.3	18:06	1241	42.5
17:39	683	26.7	18:09	1421	39.2
17:42	1456	34.1	18:12	1421	39.2
17:45	1043	143.3	18:15	1166	250.6
17:48	1259	40.5	18:18	1166	250.6
17:51	1068	47.5	18:21	690	31

同理,对其他时段的分解数据分析,亦可得到相应的小波突变系数。

在 18:24~19:21 时段,超过 $100 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 的幅值数据有七个,因此 a 为 $7/20=0.35$;在 19:06~20:03

时段，小波分层突变系数为 0.60。

2.3 小波五层突变系数的趋势分析

将 1 h 作为一个分析时段，对 17:24~20:03 时段内的监测数据计算突变系数，绘制图 4 所示趋势图。可见，随时间推移，趋势曲线总体上逐渐升高。事实表明，小波突变系数的这种变化趋势与该轧机低速轴上的故障演变过程基本一致，这种变化过程在频谱分析结果的趋势图上无法体现。

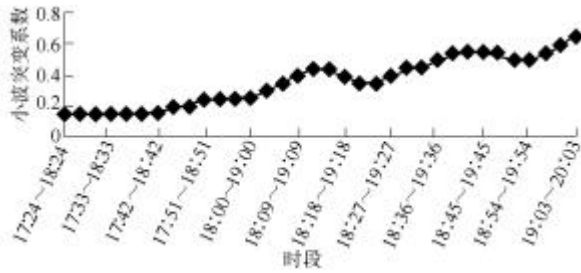


图 4 小波五层突变系数的趋势分析图

3 小波分解 + FFT 提取故障特征

低速重载轴承的特征频率一般在 0.1~20 Hz 范围内，1 Hz 以下的成分由于技术手段的限制，在频谱图上无法显示，而 1~20 Hz 的低频成分则集中在频谱图左边，通常容易被诊断人员所忽略。

3.1 振动幅值分析

图 5 是对图 1 齿轮箱突发故障前 20 多个小时内几个时刻数据(00:00、18:30、18:45、19:30、20:03)进行细化谱分析的结果。图 6 为小波五层分解后对低频段进行 FFT 分析的结果。

在不同时刻，采用两种方法获得的振幅比较如表 3 所示。其中统计的是在两种谱图中得到的最大振幅。可见，在小波分解第五层时域波形对应的频谱分析图上，故障初期(图 6a、b)与严重时期(图 6c、d、e)的振幅极值相差 14.03 倍，而传统的 FFT 细化谱分析后，其振幅极值仅相差 1.67 倍，这说明小波分析对零部件隐患的敏感性较好。同时由于小波分析对于低频信号具有较高的频率分辨率，分解后的低频段信号经 FFT 分析后，其振幅极值的变化与设备故障演变过程相一致，随着故障发展，幅值急剧增加；而设备完全损坏时，幅值略微下降。而采用细化谱分析则不能提供这一特征。

3.2 特征频率幅值分析

对齿轮箱内典型零部件的特征频率幅值进行对比分析，结果如表 4、5 所示。其中，Z7/Z8 是与损坏轴承同轴的啮合齿轮副。方法 1 是 FFT 细化谱分析；方法 2 是小波五层分解后低频段时域信号的

FFT 分析。与表 3 规律类似，各特征频率的振幅随时间的变化过程与故障演变相一致，而低速重载设备的正常振动信号本身亦很强烈，淹没在这种强背景噪声中的故障信息，采用只适于平稳信号分析的 FFT 技术无法有效提取，所以表 4、5 中方法 1 得到的各特征频率振幅变化具有很大的随机性。

表 3 两种分析方法相对振幅比较

时刻	方法 1: FFT 细化谱图振幅 $A/(m \cdot s^{-2})$	方法 2: 小波五层分解 + FFT 后振幅 $A/(m \cdot s^{-2})$
00:00	21.4	8.3
18:30	13.9	10.8
18:45	17.6	115.1
19:30	12.8	98.9
20:03	15.9	67.7
相差倍数	21.4/12.8=1.67	115.1/8.3=14.03

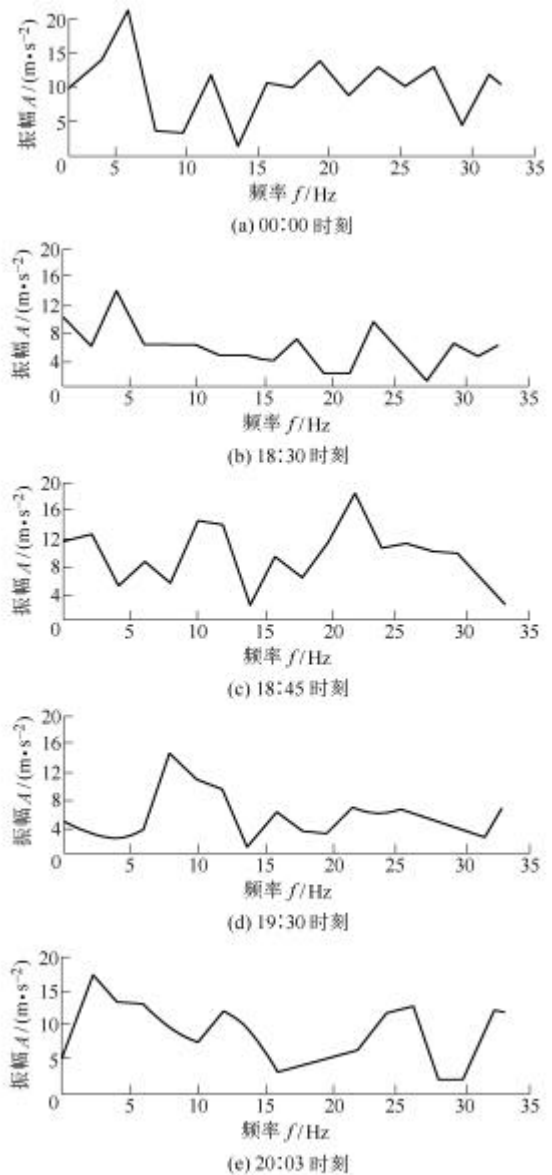


图 5 监测数据的细化谱分析

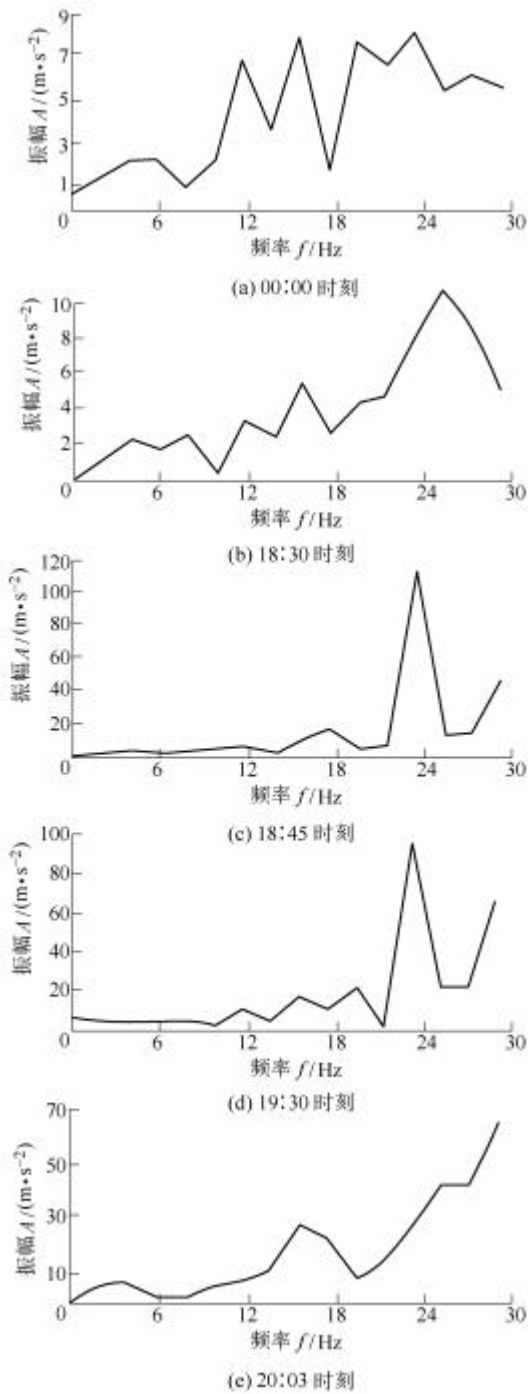


图 6 监测数据的小波分解+FFT 分析

表 4 齿轮啮合频率的相对幅值比较

时刻	11.7 Hz Z7/Z8 啮合频率 幅值		23.43 Hz Z7/Z8 啮合频率的二倍 幅值	
	方法 1	方法 2	方法 1	方法 2
	$A/(m \cdot s^{-2})$	$A/(m \cdot s^{-2})$	$A/(m \cdot s^{-2})$	$A/(m \cdot s^{-2})$
00:00	12.10	7.5	12.98	8.26
18:30	4.80	3.4	9.85	8.36
18:45	13.21	15.82	9.75	115.11
19:30	8.92	12.29	5.38	98.99
20:03	10.96	11.84	10.64	12.91
幅值相差倍数	2.52	4.65	2.41	13.93

表 5 轴承特征频率的相对幅值比较

时刻	15.62 Hz 外圈频率幅值		19.53 Hz 滚动体通过频率幅值	
	方法 1	方法 2	方法 1	方法 2
	$A/(m \cdot s^{-2})$	$A/(m \cdot s^{-2})$	$A/(m \cdot s^{-2})$	$A/(m \cdot s^{-2})$
00:00	10.73	8.19	13.73	7.91
18:30	3.57	5.58	9.85	4.36
18:45	8.84	11.45	10.78	4.55
19:30	5.47	17.73	2.69	23.62
20:03	2.53	1.47	5.15	8.78
幅值相差倍数	4.24	12.06	5.10	5.41

观察上述两种方法处理后各特征频率幅值的变化规律，可以得出如下几点。

(1) 从特征频率幅值的差异性衡量，小波分解后进行 FFT 分析的方法明显优于单纯的细化谱分析，采用前者提取的特征频率更容易识别。

(2) 事故发生前的(18:45 和 19:30 两个时刻)，采用方法 2 可以发现各特征频率振幅剧烈变化，将其作为停机报警值是非常合适的，若此时停机，设备损失将会大为减少。

(3) 当低速轴承损坏时，以上四个特征频率尤其是齿轮啮合频率可以作为判断故障的参考。

4 结 论

小波分析提取的特征值对零部件隐患的敏感性较好，可以用这些特征值进行故障诊断。

(1) 定义的小波分层突变系数以及用该系数所做的趋势图可以清楚的看到有隐患零部件劣化发展的趋势。

(2) 对小波分解后的信号采用 FFT 分析较传统的 FFT 分析所提取的特征频率更明显，从而使维护人员能从容决策，避免突发事故产生。

(3) 低速轴轴承损坏时，同轴齿轮的啮合频率及谐波、外圈频率、滚动体通过频率等可以作为判断故障的特征频率，尤其要注意齿轮啮合频率。在轴承隐患后期，齿轮啮合频率的幅值将远远高于轴承特征频率的幅值，一旦发现这种特征，要立即采取维护措施，防止发生恶性事故。

参 考 文 献

- 袁小宏, 屈梁生. 机器振动诊断中信号处理方法的研究. 西安交通大学学报, 2001, 35(7): 714 ~ 718
- Wang W Y. Early detection of gear tooth cracking using the resonance demodulation technique. Mechanical Systems and Signal Processing, 2001, 15(5): 887 ~ 903
- 王志刚, 李友容, 吕勇. 斗轮式堆取料机回转支承故障诊断研究. 振动与冲击, 2002, 21(3): 49 ~ 51

- 4 赵学智, 陈统坚, 叶邦彦. 基于参数方程的小波基自适应选择. 机械工程学报, 2004, 40(11): 123 ~ 128
- 5 贾民平, 许飞云. 小波尺度函数在旋转机械故障诊断中的应用. 振动、测试与诊断, 2004, 24(1): 5 ~ 10
- 6 高立新, 邢钧, 雷迅. 基于小波分析的齿轮箱故障诊断. 北京科技大学学报, 2003, 25(3): 267 ~ 269
- 7 何岭松. 小波函数性质及其对小波分析结果的影响. 振动工程学报, 2000, 13(1): 143 ~ 146
- 8 张俊红, 韩军, 郝志勇. 基于连续小波变换的汽轮发电机组轴系扭振及其主动控制模拟试验的研究. 机械工程学报, 2004, 40(1): 183 ~ 187
- 9 Lin J. Feature extraction based on morlet wavelet and its application for mechanical fault diagnosis. Journal of Sound and Vibration. 2000, 234(1): 135 ~ 148

RESEARCH ON FAULT DIAGNOSIS TECHNOLOGY OF LOW SPEED AND HEAVY DUTY EQUIPMENTS BASED ON WAVELET ANALYSIS

Gao Lixin Zhang Jianyu Cui Lingli
(Key Laboratory of Advanced Manufacturing
Technology, Beijing University of Technology,
Beijing 100022)

Ding Qingxin
(Electromechanical Project Institute, China
University of Petroleum, Beijing 100022)

Abstract: The sudden fault on the low speed and heavy duty equipments are very difficult to recognize and it can bring about great loss. Though the equipments can be maintained by the vibration monitoring technology, the fault information on the low speed shaft can't be easily picked through the frequency spectrum analysis. The necessary information on the low frequency range can be obtained by wavelet analysis on the monitoring data. The sultation coefficient of wavelet decomposition on the vibration signal in some time range can be regarded as the characteristic value to judge the fault. Furthermore, the coefficients can capture the developing process of the fault. For the same series monitoring data, the refinable spectrum analysis and FFT analysis compounding wavelet decomposition are both used to complete the comparative research. The achievements show that the refinable spectrum method can't predict the fault reason and location. On the other hand, after the composite signal processing through wavelet analysis and FFT technique, the vibration amplitudes variation of the characteristic frequency of the hidden fault are very intense. As a result, it is very helpful to precisely recognize the early fault on the low speed and heavy duty equipments.

Key words : Low-speed heavy-duty Spectrum analysis
Wavelet analysis

作者简介:高立新,男,1953年出生,副教授。主要研究方向为机电设备故障诊断。

E-mail : lead0003@163.com